



# FORMATION : INTRODUCTION A LA SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Arouna Darga

## ► To cite this version:

Arouna Darga. FORMATION : INTRODUCTION A LA SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES. Doctorat. France. 2015. cel-01253446

**HAL Id: cel-01253446**

**<https://hal-centralesupelec.archives-ouvertes.fr/cel-01253446>**

Submitted on 10 Jan 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial| 4.0 International License

# ***FORMATION : INTRODUCTION A LA SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES***

A. Darga,

Group of Electrical Engineering of Paris (GeePs)

# Plan

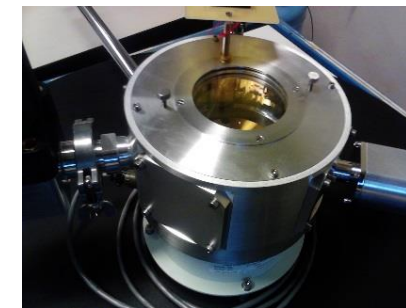
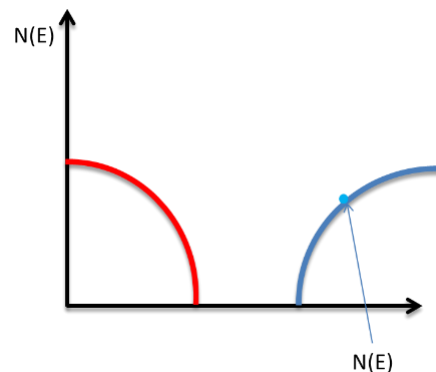
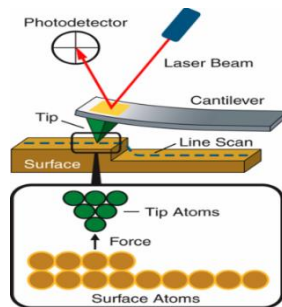
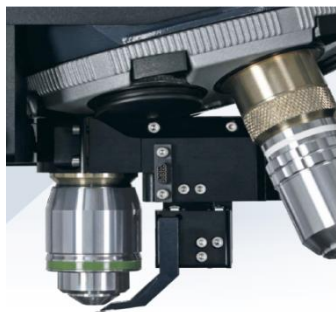
- Introduction
  - Objectifs de la formation
  - Organisation
- Séance 1
  - SCAPS et quelques rappels
  - Début projets
    - ZnO/CdS/CIGSe
    - HIT
    - PIN
    - Homojonction
- Séance 2 : suite projets
- Conclusion

**GeePs (Head : Prof. C. Marchand)**  
Semiconductor Modelling and Characterization  
**Head : Prof. J. P. Kleider**

Materials-Interfaces-Devices  
Nano / Micro properties

Characterization  
Modelling/Simulation

Materials-Interfaces-Devices  
Macroscopic properties



Co-localized characterization  
confocale Microscopy:

- ✓  $\mu$ PL,  $\mu$ Raman,
- ✓ AFM, C-AFM
- ✓ Resiscope (CP-AFM)

Softwares :

[DeOST : electronic transport properties:](#)

AFORS-HET (1D), SCAPS (1D)

[TCAD : Silvaco TCAD, Cogenda TCAD](#)

Traps states Spectroscopy

- ✓ [Photocurrent \(AC, DC, transient\)](#)
- ✓ Capacitance (AC, transient)

....

# ***Introduction : Objectifs de la formation***

A la fin de la formation vous devriez être capable d'utiliser SCAPS :

- Pour **construire un modèle simplifié** d'une **cellule PV**
- Pour simuler les **caractéristiques électriques** d'une **cellule PV**
  - **Quelque soit la technologie**: matériau (Silicium, III-V...) ou filière (couches minces, cristallin)
  - **Quelque soit le type de jonction active** :
    - Homo-jonction,
    - hétérojonction
    - PIN
    - ....
- Pour décrire le fonctionnement interne d'une cellule PV
  - Interpréter, expliquer les résultats de la simulation

# ***Introduction : Organisation***

Formation par la pratique

## **→ Session 1 (1 h 20) :**

- rappels

- découverte de SCAPS

- début projets

## **→ Session 2 ( 1h 20) : Suite projets**

# ***SESSION 1 : INTRODUCTION À SCAPS***

A. DARGA

# Session 1: SCAPS

## SCAPS → Solar Cell Capacitance Simulator



### → Créateurs

Prof. Marc Burgelman,

Alex Niemegeers, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave

→ Gratuit avec support!

→ Pour obtenir → envoyer un message de demande au Prof. Marc Burgelman

→ Adresse et informations disponible ici : <http://scaps.elis.ugent.be/>



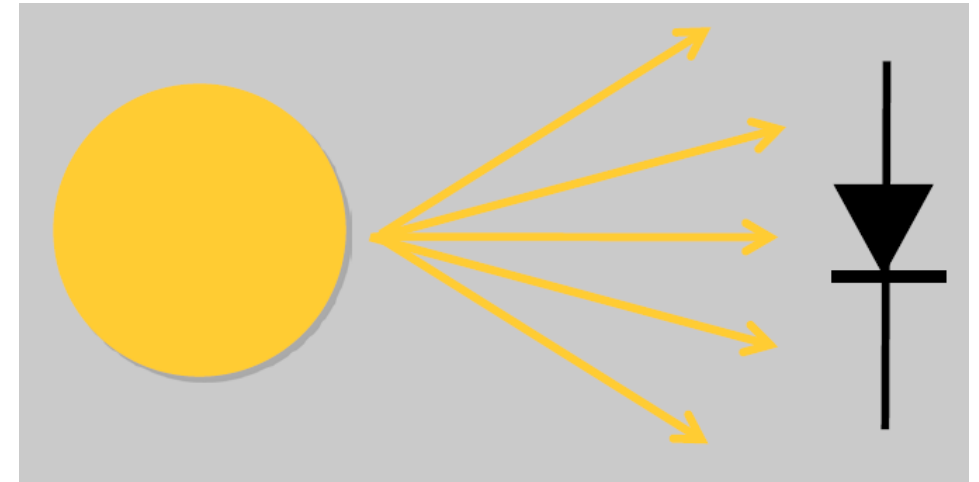
# Session 1: SCAPS

- Qu'est-ce qu'une cellule photovoltaïque?

## Diode

- Jonction PN :
  - Homojonction
  - Hétérojonction
- Jonction PIN
- Jonction Schottky ou Metal/Semiconducteur
- Jonction Métal/Semiconducteur/Métal

## Diode éclairée

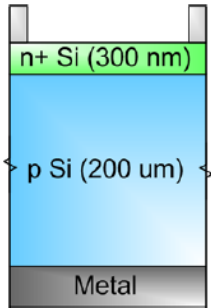


- Pour comprendre comment une cellule PV fonctionne il faut
  - Comprendre comment fonctionne la DIODE : **Caractéristiques à l'obscurité**
  - Comprendre comment la **lumière est absorbée dans un semiconducteur** : sans la diode
  - Comprendre ce qui se passe quand on met les **2 ensemble**

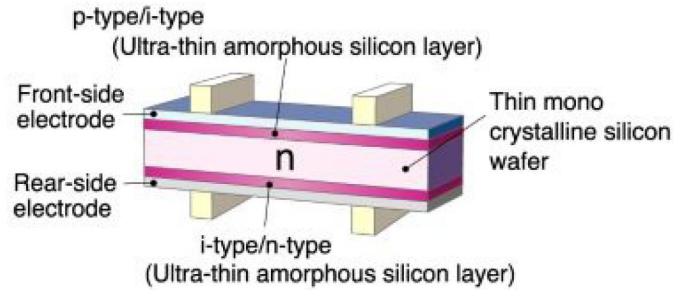
# Session 1 : Rappels

## ■ Qu'est-ce qu'une cellule photovoltaïque?

Homojonction PN



Hétérojonction PN



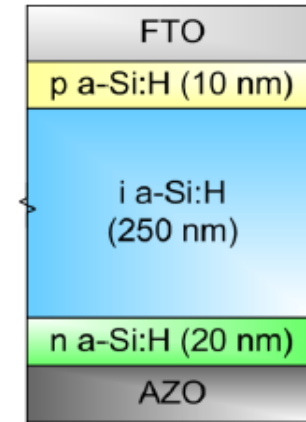
Silicium cristallin

Hétérojonction PN

ZnO-Al ( $n^+$ ): 0,5 $\mu\text{m}$
ZnO-i (intrinsèque) : 0,1 $\mu\text{m}$
CdS ( n type) : 0,02-0,07 $\mu\text{m}$
$\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{1-y}\text{S}_y)_2$ ( p type): 1-2,3 $\mu\text{m}$
$\text{MoSe}_2$ ou $\text{MoS}_2$ : 0,4-0,7 $\mu\text{m}$
Mo: 0,2-0,5 $\mu\text{m}$
Glass : 1-6 mm

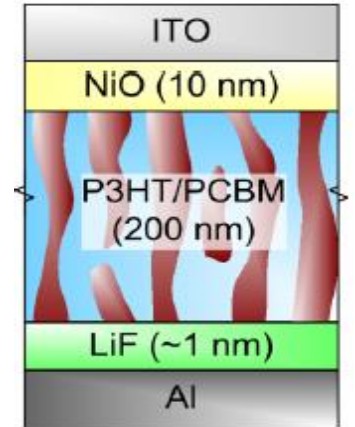
Couches minces  
CIGSe, CdTe

PIN



Couches minces  
a-Si, Perovskites

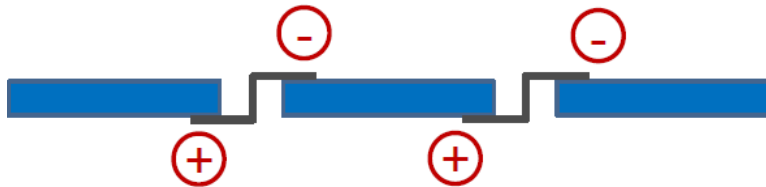
MIM



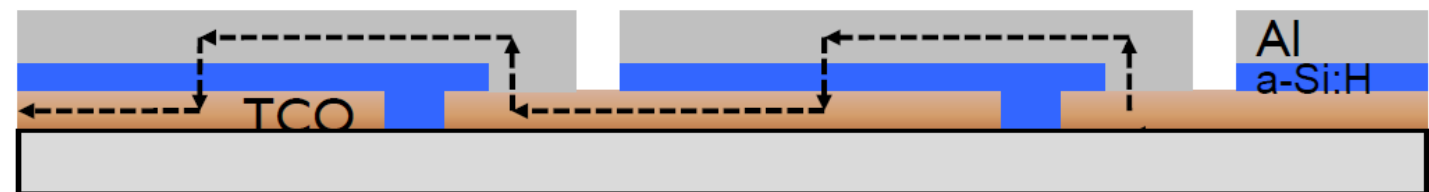
Couches minces  
organique

Connection

Silicium cristallin



Connection Couches minces



# Session 1 : SCAPS

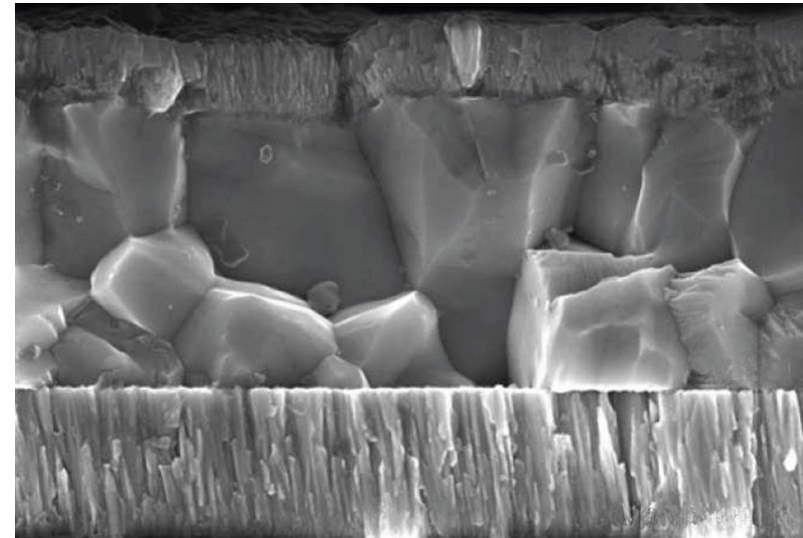
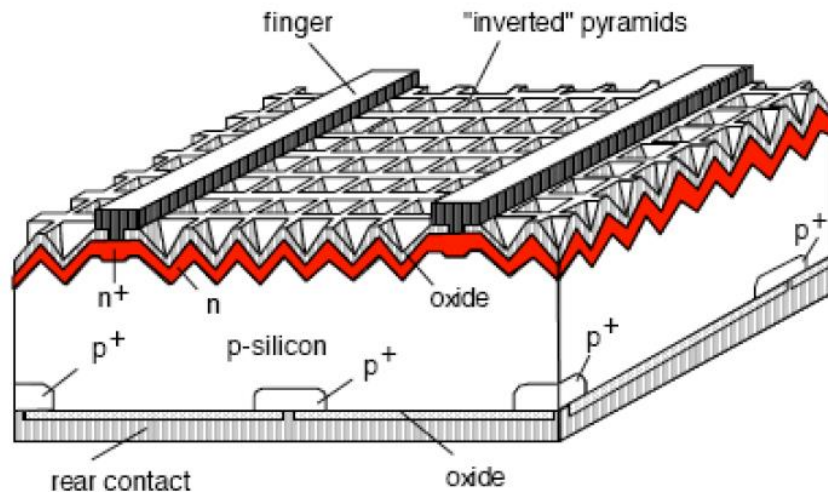
## SCAPS → Solar Cell Capacitance Simulator

SCAPS ?

Logiciel de simulation 1D de cellule PV.

Ne traite pas les effets 2D comme

- Conduction latérale : Joint de grain, Taille des contacts...
- Texturation avancées: (possibilité de rentrer les données!)



# Session 1: SCAPS

## Entrées (interface Graphique):

- Structure de la cellule PV
  - Composition, dimensions, contacts, dopage
- Propriétés des couches:
  - constante diélectrique, paramètres des bandes( band interdite, affinité électronique...) mobilité des porteurs libres, paramètres de recombinaison, coefficient d'absorption, etc...
- Conditions de fonctionnement:
  - température, tension de polarisation, spectre de l'éclairement...

## Méthode des differences Finies :

Résolution des équations de Poisson, continuité et transport

Sous diverses conditions:

Équilibre, DC, AC, éclairement

Recombinaisons : Radiative, Auger, Shockley-Read-Hall

....

Caractéristiques locales interne de la cellule : diagramme des bandes, taux de génération, taux de recombinaison, concentrations et densité de courant des porteurs libres...

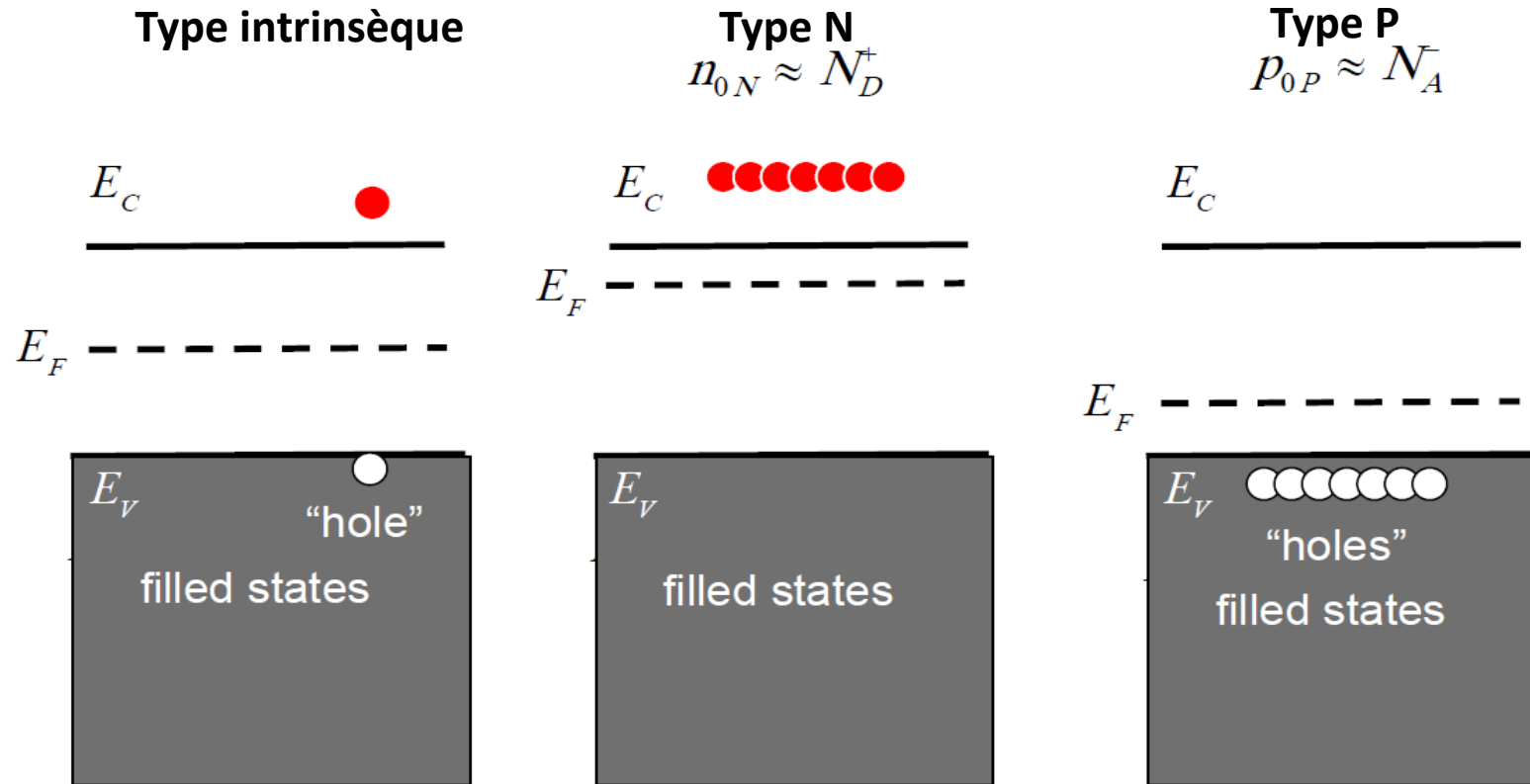
Simulation d'expérience:  $I(V,T, \text{flux})$ ,  $C-G(F,V,T)$ , réponse-spectrale...

layer 1	
thickness (μm)	2.000
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.200
electron affinity (eV)	4.500
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+19
VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	5.000E+1
hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	5.000E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electron: 1.000E+0 effective mass of holes: 1.000E+0
no ND grading (uniform)	shallow uniform donor density ND (1/cm <sup>3</sup> ) 1.000E+15
no NA grading (uniform)	shallow uniform acceptor density NA (1/cm <sup>3</sup> ) 1.000E+15
Absorption model	
alpha (y=0) <input type="checkbox"/> from model <input type="checkbox"/> from file	
absorption constant A (1/cm eV <sup>(1/2)</sup> )	1.000E+5
absorption constant B (eV <sup>(1/2)</sup> /cm)	0.000E+0
show	save
absorption file for y = 0	

# Session 1 : SCAPS et Niveau de Fermi

## ■ Semiconducteurs: Dopage

→ Dans SCAPS les dopants sont complètement ionisés : quelque soit la température

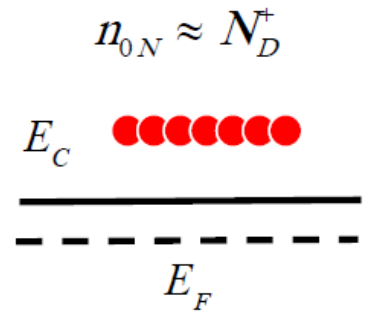


The screenshot shows the SCAPS 3.3.01 Layer Properties Panel for Layer 1. The panel is divided into several sections:

- General:** thickness ( $\mu\text{m}$ ) is 2.000. The layer is pure A:  $y = 0$ , uniform. The semiconductor property P of the pure material is pure A ( $y = 0$ ).
- Physical Properties:** bandgap (eV) is 1.200, electron affinity (eV) is 4.500, dielectric permittivity (relative) is 10.000, CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ ) is  $1.000\text{E}+19$ , VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ ) is  $1.000\text{E}+19$ , electron thermal velocity (cm/s) is  $1.000\text{E}+7$ , hole thermal velocity (cm/s) is  $1.000\text{E}+7$ , electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) is  $5.000\text{E}+1$ , and hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) is  $5.000\text{E}+1$ .
- Carrier Concentration:** Allow Tunneling is checked. effective mass of electron is  $1.000\text{E}+0$  and effective mass of holes is  $1.000\text{E}+0$ .
- Doping:** no ND grading (uniform) is selected, shallow uniform donor density  $N_D$  ( $1/\text{cm}^3$ ) is  $1.000\text{E}+15$ , no NA grading (uniform) is selected, and shallow uniform acceptor density  $N_A$  ( $1/\text{cm}^3$ ) is  $1.000\text{E}+15$ .
- Absorption model:** alpha ( $y=0$ ) is from model, absorption constant A ( $1/\text{cm eV}^{1/2}$ ) is  $1.000\text{E}+5$ , and absorption constant B ( $\text{eV}^{1/2}/\text{cm}$ ) is  $0.000\text{E}+0$ .

# Session 1 : SCAPS et Niveau de Fermi

- Dans SCAPS → Maxwell-Boltzman
- Ne gère pas les semiconducteurs dégénérés

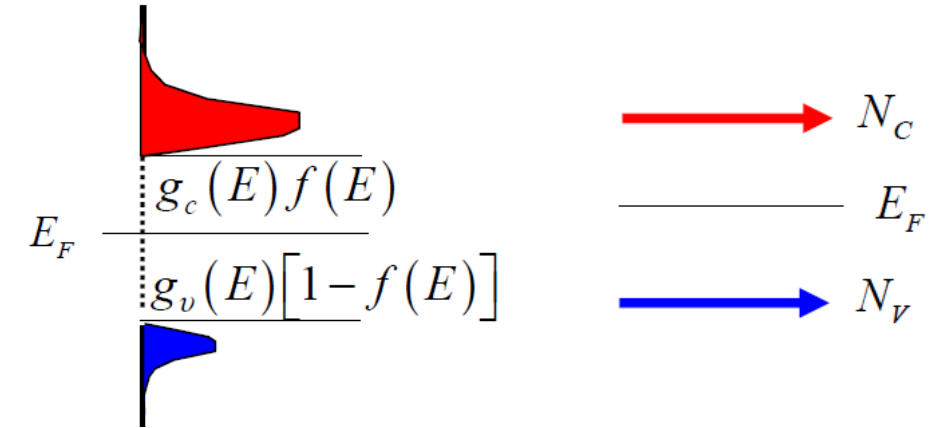
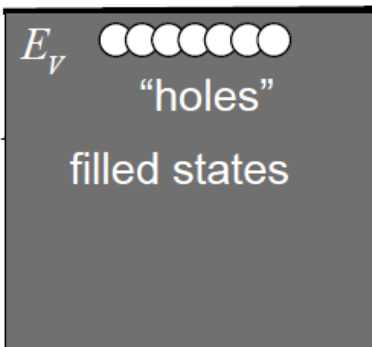
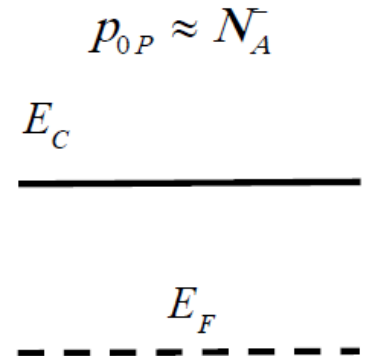
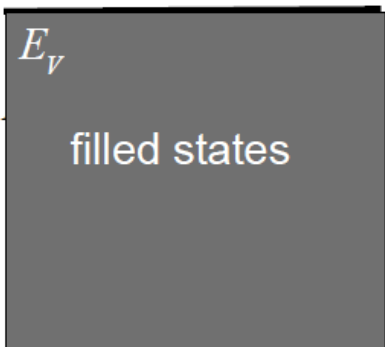


$$f_0(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/k_B T}}$$

$$E = E_F \rightarrow f_0(E) = \frac{1}{2}$$

$$E \ll E_F \rightarrow f_0(E) = 1$$

$$E \gg E_F \rightarrow f_0(E) = 0$$



$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E-E_F)/kT]} \cong \begin{cases} \text{Fermi-Dirac} \\ \text{Maxwell-Boltzmann} \end{cases}$$

$$n = N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_F}{kT}\right] \text{ with } N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

$$p = N_V \exp\left[-\frac{E_F - E_V}{kT}\right] \text{ with } N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

# *Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique*

Le transport des charges dans un semi-conducteur est, habituellement, caractérisé par deux paramètres, la mobilité  $\mu_n(\mu_p)$  et la durée de vie  $\tau_n(\tau_p)$  des électrons (trous) : **Longueur de diffusion**

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \left( \frac{k_B T}{q} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_n \tau_n)^{\frac{1}{2}}$$

$$D_n = \left( \frac{k_B T}{q} \right) \mu_n$$

Durée de vie  $\tau_n(\tau_p)$  des électrons (trous)  $\rightarrow$  centres de recombinaisons ou défauts

# Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique

- 3 types de mécanismes de recombinaisons
  - Radiative
  - Auger
  - Indirect via défaut ou centre recombinant

Recombination model

Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0

Recombination at defects: Summary

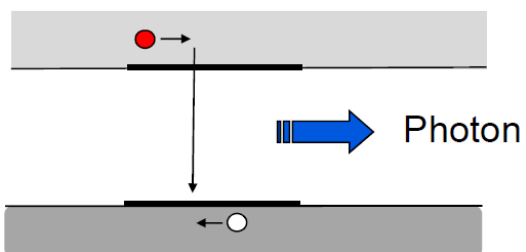
Add a Defect 1



# Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique

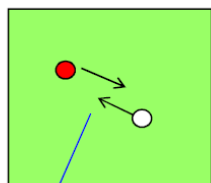
## Recombinaison : Direct ou bande à bande

In energy space ...

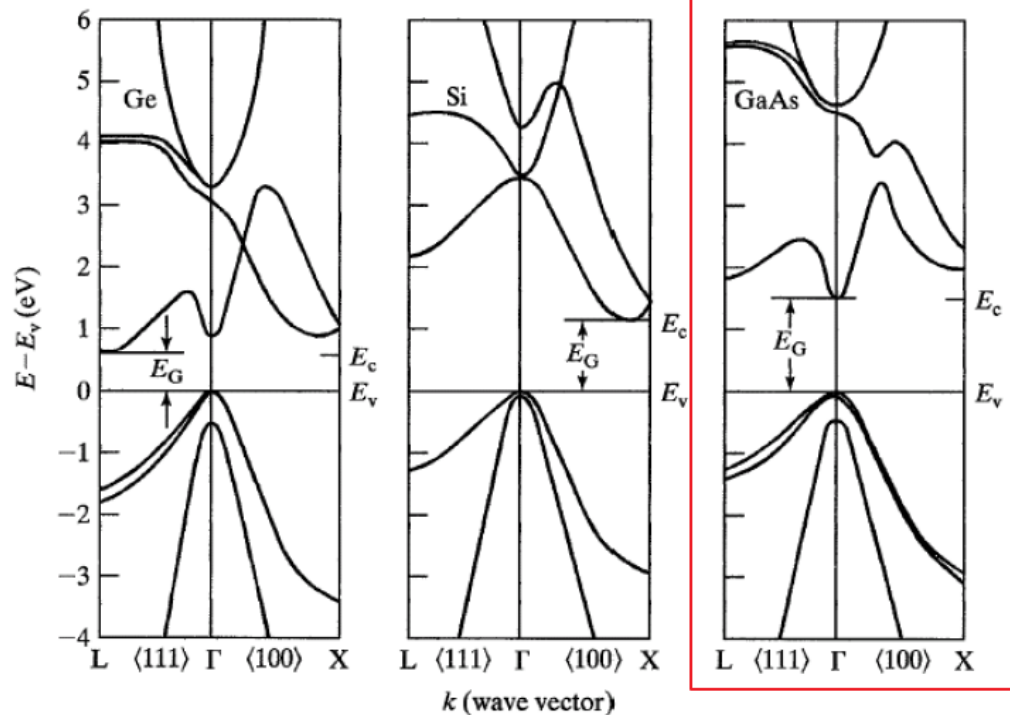


Direct transition –  
direct gap material

In real space ...



e and h must  
have same wavelength



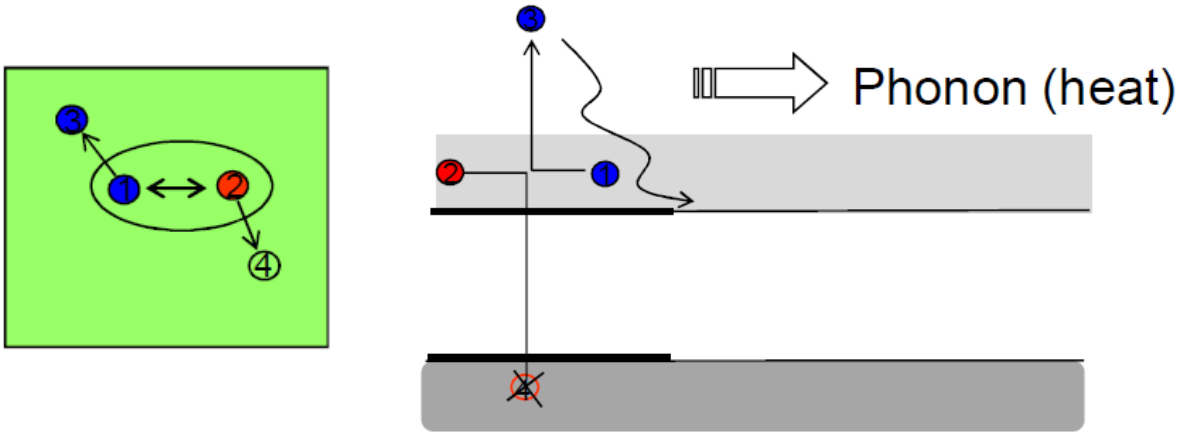
Recombination model	
Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Recombination at defects: Summary	

Très peu probable

Plus probable dans les matériaux à gap direct

# Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique

## Recombinaison : Auger



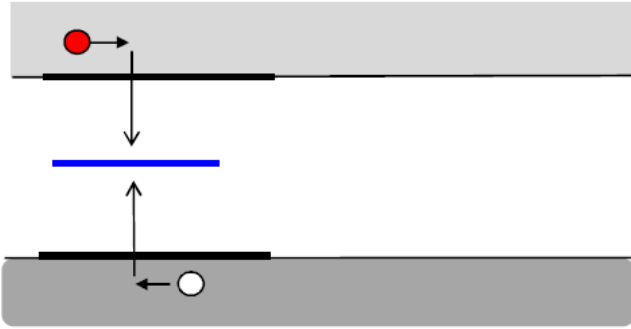
Recombination model	
Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Recombination at defects: Summary	

Il faut une grande quantité de porteurs libres :

- Éclairement intense
- Fort dopage

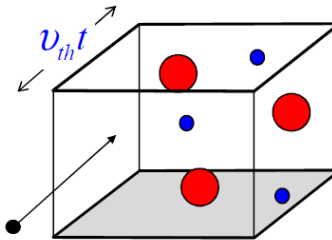
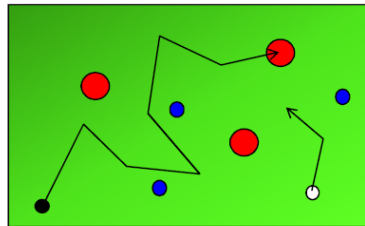
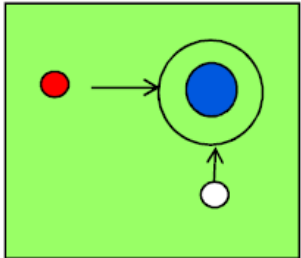
# Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique

## Recombinaison indirect : défaut



$$R = \frac{np - n_i^2}{\left( \frac{1}{c_p N_T} \right) (n + n_1) + \left( \frac{1}{c_n N_T} \right) (p + p_1)}$$

$\tau_n \rightarrow \frac{1}{c_p N_T}$ 
 $\tau_p \rightarrow \frac{1}{c_n N_T}$



$$\frac{dn}{dt} = -n \times \left[ \frac{\text{Volume} \times p_T \times \text{RelArea}}{\text{TotalArea} \times t} \right]$$

$$\frac{dn}{dt} = -n \times \left[ \frac{A \times v_{th} \times p_T \times \sigma_n}{A \times t} \right]$$

$$\equiv -c_n p_T n \quad c_n \equiv \sigma_n v_{th}$$

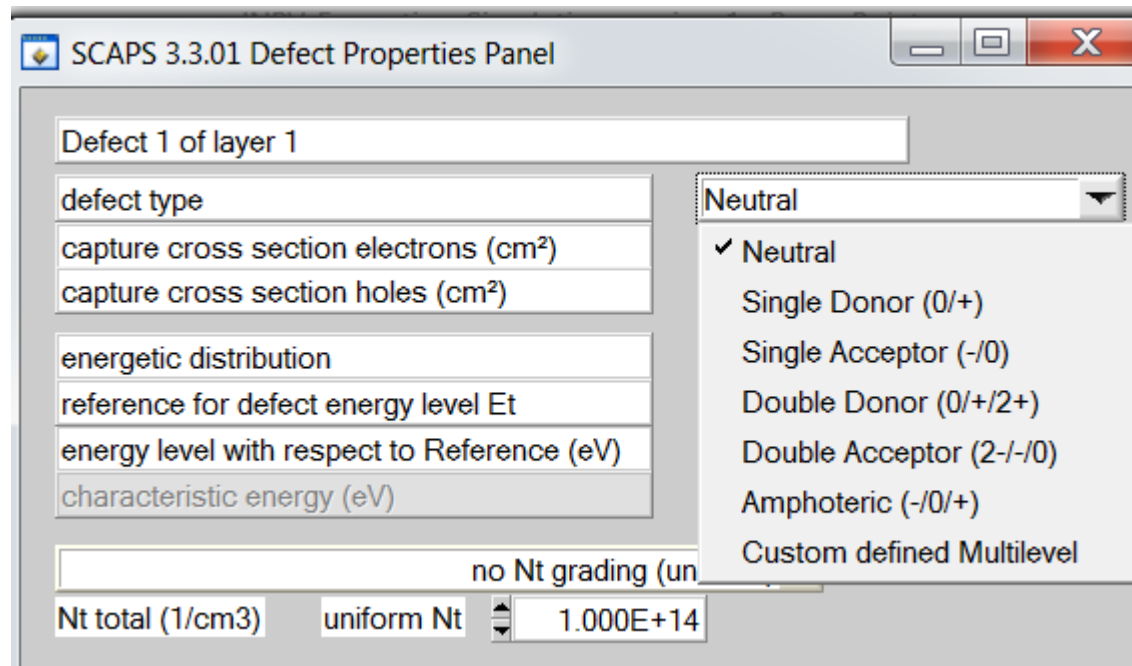
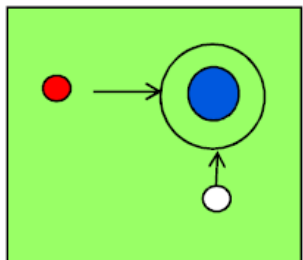
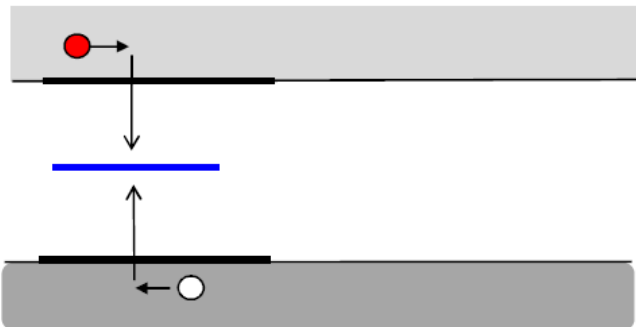
$$\frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$v_{th} \approx 10^7 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Defect 1 of layer 1	
defect type	Neutral
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
energetic distribution	Single
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.100
no Nt grading (uniform)	
Nt total (1/cm3)	uniform Nt 1.000E+14

# Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique

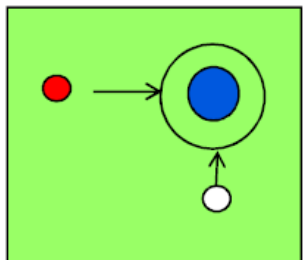
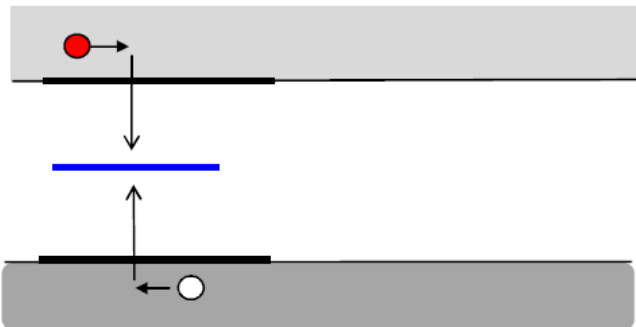
## Recombinaison indirect : défaut



Neutre → lifetime killer : pas d'électrostatique

# Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique

## Recombinaison indirect : défaut



Defect 1 of layer 1	
defect type	Neutral
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
energetic distribution	Single
reference for defect energy level Et	
energy level with respect to Reference (eV)	
characteristic energy (eV)	
no Nt grading (uniform Nt)	
Nt total (1/cm <sup>3</sup> )	uniform Nt 1.000E+14

Single

☒ Single  
☐ Uniform  
☐ Gauß  
☐ CB tail  
☐ VB tail

Distributions

# Session 1 : SCAPS et propriétés de transport électronique

## ■ Semiconducteur: Paramètres importants

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(\frac{-E_G}{2kT}\right) \text{ cm}^{-3}$$

Effective density of states:

$$N_C = 2 \left[ \frac{m_n^* kT}{2\pi\hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}}, \quad N_V = 2 \left[ \frac{m_p^* kT}{2\pi\hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}} \text{ cm}^{-3}$$

Diffusivity

$$D_n = \left( \frac{kT}{q} \right) \mu_n, \quad D_p = \left( \frac{kT}{q} \right) \mu_p \text{ cm}^2/\text{s}$$

Minority carrier diffusion length:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \text{ (length units)}$$

# Session1 : SCAPS et jonctions

- Diodes : homojonction : équilibre = résolution équation de Poisson

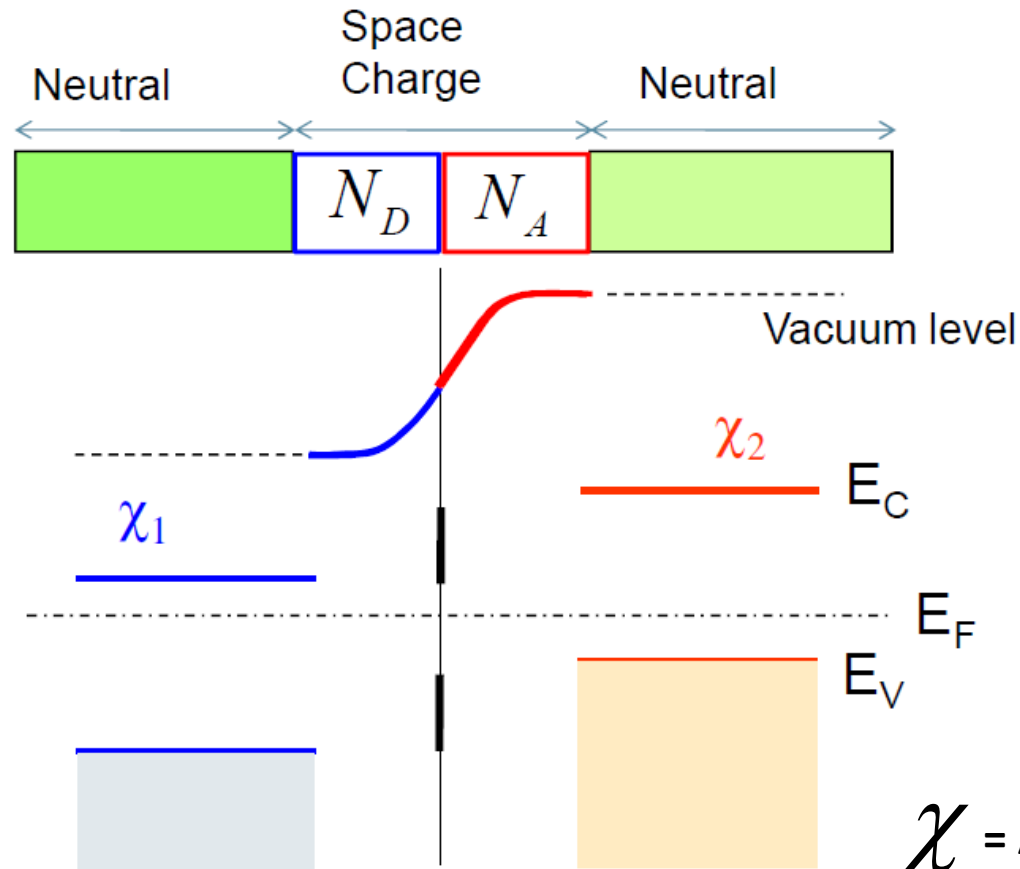
$$\nabla \bullet D = q(p - n + N_D^+ - N_A^-)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \bullet \mathbf{J}_N - r_N + g_N$$

$$\mathbf{J}_N = qn\mu_N E + qD_N \nabla n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-1}{q} \nabla \bullet \mathbf{J}_P - r_P + g_P$$

$$\mathbf{J}_P = qp\mu_P E - qD_P \nabla p$$



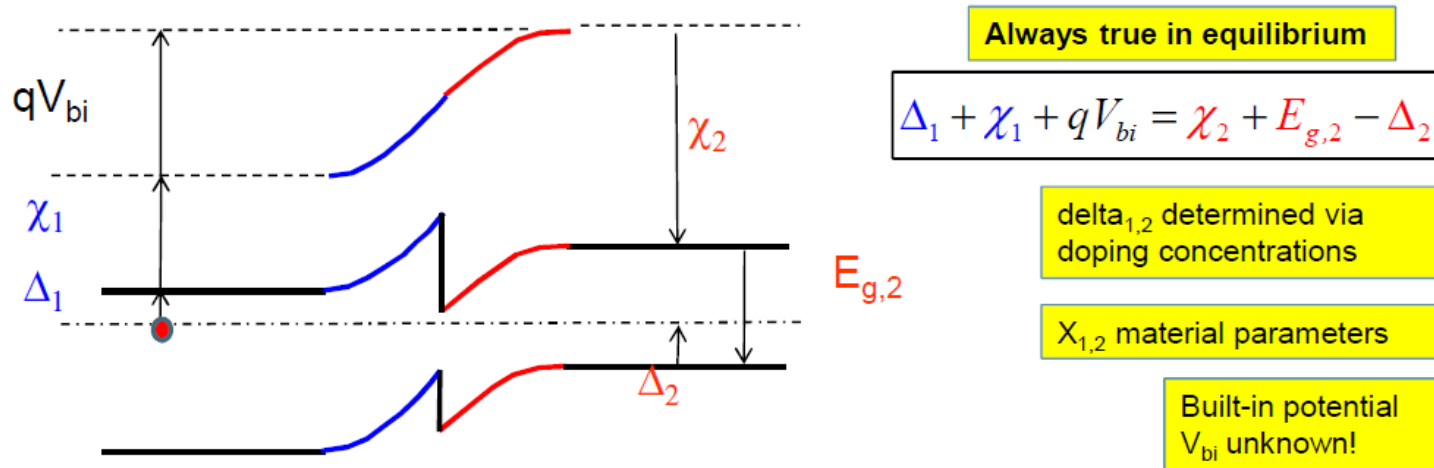
## Drawing Recipe

- 1) Start with  $E_F$
- 2)  $E_C/E_V$  in bulk n-side
- 3)  $E_C/E_V$  in bulk p-side
- 4) Vacuum level in N
- 5) Vacuum level in P
- 6) Join vacuum levels
- 7) "Transfer" vacuum slopes to join  $E_C/E_V$

$\chi$  = Affinité électronique

# Session1 : SCAPS et jonctions

## ■ Diodes : Jonctions : équilibre = résolution équation de Poisson

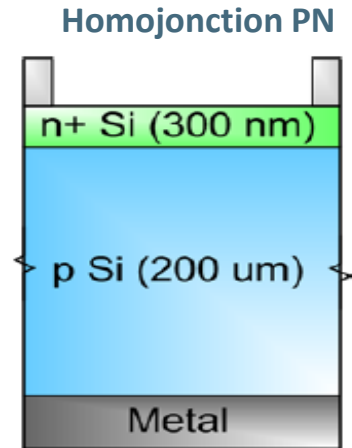


$$\begin{aligned}
 qV_{bi} &= E_{g,2} - \Delta_2 - \Delta_1 + \chi_2 - \chi_1 \\
 &= \left( E_{g,2} + k_B T \ln \frac{N_A}{N_{V,2}} \right) + k_B T \ln \frac{N_D}{N_{C,1}} + (\chi_2 - \chi_1) \\
 &= k_B T \ln \frac{N_A N_D}{N_{V,2} N_{C,1} e^{-E_{g,2}/k_B T}} + (\chi_2 - \chi_1)
 \end{aligned}$$

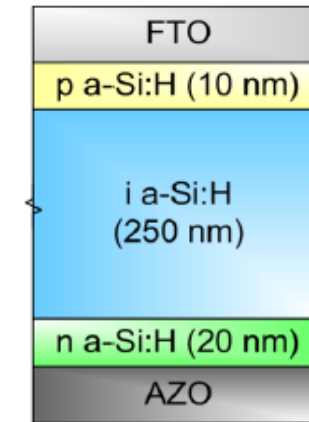


# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: Homojonction PN vs Homojonction PIN



Homojonction PIN

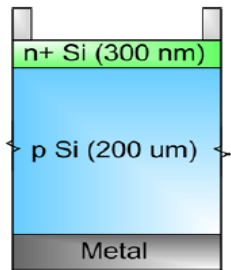


- caractéristiques à l'obscurité
  - Electrostatique :
    - Diagramme des bandes d'énergie
    - Tension de diffusion :  $V_{bi}$
    - Champ électrique interne
  - Caractéristiques en régime continu (DC)
    - Courant de recombinaison
    - Courbe courant-tension

# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN

Homojonction PN



Layers

left contact (back)

couche p

couche n

add layer

right contact (front)

Interfaces

illuminated from : ☐ right ☐ left

apply voltage V to : ☐ left contact ☐ right contact

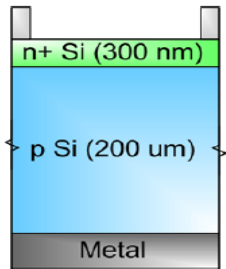
current reference as a : ☐ consumer ☐ generator

Info on graded parameters only available after a calculation

# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN

Homojonction PN



LAYER 1		couche p	
thickness (μm)	2.000		
		uniform pure A (y=0)	
The layer is pure A: y = 0, uniform		0.000	
Semiconductor Property P of the pure material		pure A (y = 0)	
bandgap (eV)	1.200		
electron affinity (eV)	4.500		
dielectric permittivity (relative)	10.000		
CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+19		
VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+19		
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	1.000E+3		
hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	5.000E+2		
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electron: 1.000E+0		
	effective mass of holes 1.000E+0		
no ND grading (uniform)			
shallow uniform donor density ND (1/cm <sup>3</sup> )		0.000E+0	
no NA grading (uniform)			
shallow uniform acceptor density NA (1/cm <sup>3</sup> )		1.000E+15	
Absorption model			
		alpha (y=0)	
		<input type="checkbox"/> from model <input checked="" type="checkbox"/> from file	
absorption constant A (1/cm eV <sup>(1/2)</sup> )		1.000E+5	
absorption constant B (eV <sup>(1/2)</sup> /cm)		0.000E+0	

Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0

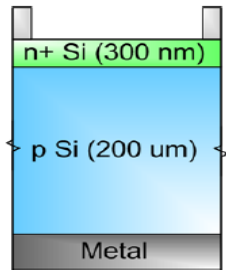
  

Recombination at defects: Summary	
Defect 1	
Defect 1	
charge type : neutral	
total density (1/cm <sup>3</sup> ): Uniform 1.000e+16	
grading Nt(y): uniform	
energydistribution: single; Et = 0.60 eV above EV	
this defect only, if active: tau_n = 1.0e+01 ns, tau_p = 1.0e+01 ns	
this defect only, if active: Ln = 5.1e+00 μm, Lp = 3.6e+00 μm	

# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN

### Homojonction PN



LAYER 2		couche n	
thickness ( $\mu\text{m}$ )	0.050		
The layer is pure A: $y = 0$ , uniform		uniform pure A ( $y=0$ )	
Semiconductor Property P of the pure material		pure A ( $y = 0$ )	
bandgap (eV)	1.200		
electron affinity (eV)	4.500		
dielectric permittivity (relative)	10.000		
CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	1.000E+19		
VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	1.000E+19		
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	1.000E+3		
hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	5.000E+2		
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electron: 1.000E+0		
	effective mass of holes 1.000E+0		
no ND grading (uniform)			
shallow uniform donor density ND ( $1/\text{cm}^3$ )		1.000E+18	
no NA grading (uniform)			
shallow uniform acceptor density NA ( $1/\text{cm}^3$ )		0.000E+0	
Absorption model			
alpha ( $y=0$ )			
<input type="checkbox"/> from model <input type="checkbox"/> from file			
absorption constant A ( $1/\text{cm eV}^{1/2}$ )		1.000E+5	
absorption constant B ( $\text{eV}^{1/2}/\text{cm}$ )		0.000E+0	

#### Recombination model

Band to band recombination

Radiative recombination coefficient ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	0.000E+0
Auger electron capture coefficient ( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	0.000E+0
Auger hole capture coefficient ( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	0.000E+0

Recombination at defects: Summary

Defect 1

Defect 1

charge type : neutral

total density ( $1/\text{cm}^3$ ): Uniform 1.000e+18

grading Nt(y): uniform

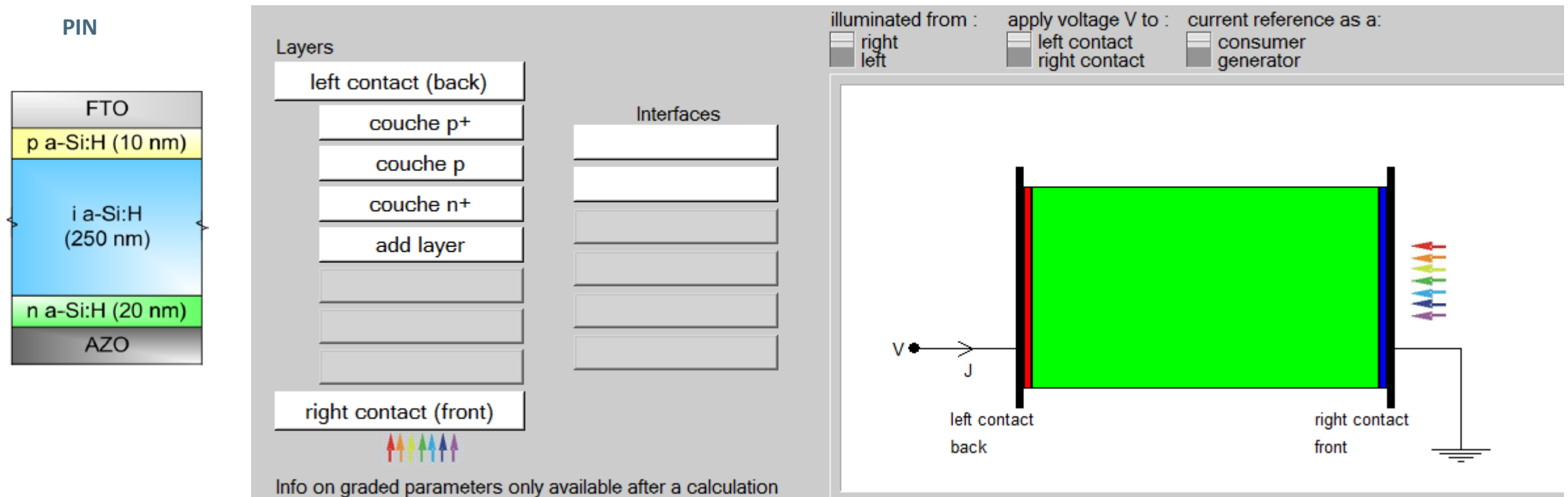
energydistribution: single; Et = 0.60 eV above EV

this defect only, if active: tau\_n = 1.0e-01 ns, tau\_p = 1.0e-01 ns

this defect only, if active: Ln = 5.1e-01  $\mu\text{m}$ , Lp = 3.6e-01  $\mu\text{m}$

# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN



# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN

PIN

**LAYER 1**

thickness ( $\mu\text{m}$ ) 0.050

uniform pure A (y=0)

The layer is pure A: y = 0, uniform

Semiconductor Property P of the pure material pure A (y = 0)

bandgap (eV)	1.200
electron affinity (eV)	4.500
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	$1.000\text{E}+19$
VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	$1.000\text{E}+19$
electron thermal velocity (cm/s)	$1.000\text{E}+7$
hole thermal velocity (cm/s)	$1.000\text{E}+7$
electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$5.000\text{E}+1$
hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$5.000\text{E}+1$
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electron: $1.000\text{E}+0$ effective mass of holes $1.000\text{E}+0$
no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ( $1/\text{cm}^3$ )	$0.000\text{E}+0$
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ( $1/\text{cm}^3$ )	$1.000\text{E}+18$

Absorption model

Recombination model

Band to band recombination

Radiative recombination coefficient ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$0.000\text{E}+0$
Auger electron capture coefficient ( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	$0.000\text{E}+0$
Auger hole capture coefficient ( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	$0.000\text{E}+0$

Recombination at defects: Summary

Defect 1

Defect 1

charge type : neutral

total density ( $1/\text{cm}^3$ ): Uniform  $1.000\text{e}+18$

grading Nt(y): uniform

energydistribution: single; Et = 0.60 eV above EV

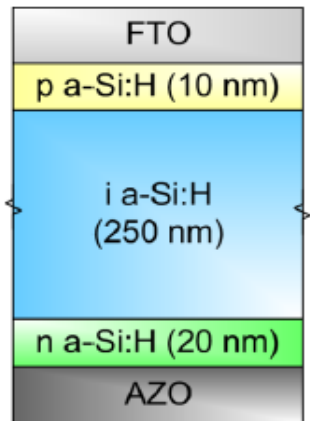
this defect only, if active: tau\_n =  $1.0\text{e}-01$  ns, tau\_p =  $1.0\text{e}-01$  ns

this defect only, if active: Ln =  $5.1\text{e}-01$   $\mu\text{m}$ , Lp =  $3.6\text{e}-01$   $\mu\text{m}$

# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN

PIN



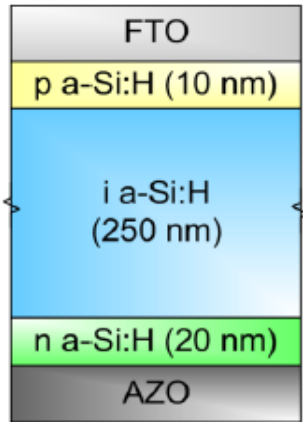
LAYER 2		couche p	
thickness (μm)	2.000		
	uniform pure A (y=0)		
The layer is pure A: y = 0, uniform		0.000	
Semiconductor Property P of the pure material		pure A (y = 0)	
bandgap (eV)	1.200		
electron affinity (eV)	4.500		
dielectric permittivity (relative)	10.000		
CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+19		
VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+19		
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	1.000E-1		
hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	1.000E-1		
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electron: 1.000E+0		
	effective mass of holes: 1.000E+0		
no ND grading (uniform)			
shallow uniform donor density ND (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+10		
no NA grading (uniform)			
shallow uniform acceptor density NA (1/cm <sup>3</sup> )	1.000E+10		
Absorption model			
		alpha (y=0)	
		<input type="checkbox"/> from model <input checked="" type="checkbox"/> from file	
absorption constant A (1/cm eV <sup>(1/2)</sup> )	1.000E+5		
absorption constant B (eV <sup>(1/2)</sup> /cm)	0.000E+0		

Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Recombination at defects: Summary	
Defect 1	
Defect 1	
charge type : neutral	
total density (1/cm <sup>3</sup> ): Uniform 1.000e+16	
grading Nt(y): uniform	
energydistribution: single; Et = 0.60 eV above EV	
this defect only, if active: tau_n = 1.0e+01 ns, tau_p = 1.0e+01 ns	
this defect only, if active: Ln = 5.1e+00 μm, Lp = 3.6e+00 μm	

# Session 1 : Travaux pratiques

## ■ Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN

PIN



LAYER 3		couche n+	
thickness (μm)		0.050	
		uniform pure A (y=0)	
The layer is pure A: y = 0, uniform		0.000	
Semiconductor Property P of the pure material		pure A (y = 0)	
bandgap (eV)		1.200	
electron affinity (eV)		4.500	
dielectric permittivity (relative)		10.000	
CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )		1.000E+19	
VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )		1.000E+19	
electron thermal velocity (cm/s)		1.000E+7	
hole thermal velocity (cm/s)		1.000E+7	
electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)		5.000E+1	
hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)		5.000E+1	
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electron:	1.000E+0	
	effective mass of holes	1.000E+0	
no ND grading (uniform)			
shallow uniform donor density ND (1/cm <sup>3</sup> )		1.000E+18	
no NA grading (uniform)			
shallow uniform acceptor density NA (1/cm <sup>3</sup> )		0.000E+0	
Absorption model			
		alpha (y=0)	
		<input type="checkbox"/> from model	
		<input checked="" type="checkbox"/> from file	
absorption constant A (1/cm eV <sup>(1/2)</sup> )		1.000E+5	
absorption constant B (eV <sup>(1/2)</sup> /cm)		0.000E+0	

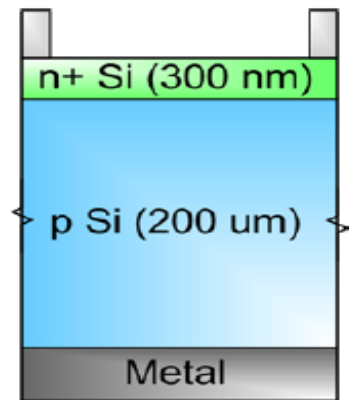
Recombination model	
Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Recombination at defects: Summary	
Defect 1	
Defect 1	
charge type : neutral	
total density (1/cm <sup>3</sup> ): Uniform 1.000e+18	
grading Nt(y): uniform	
energydistribution: single; Et = 0.60 eV above EV	
this defect only, if active: tau_n = 1.0e-01 ns, tau_p = 1.0e-01 ns	
this defect only, if active: Ln = 5.1e-01 μm, Lp = 3.6e-01 μm	



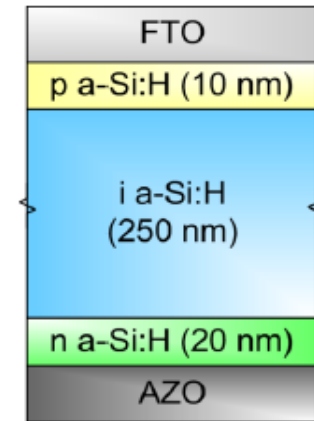
# Session 1 : Travaux pratiques

- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN

Homojonction PN



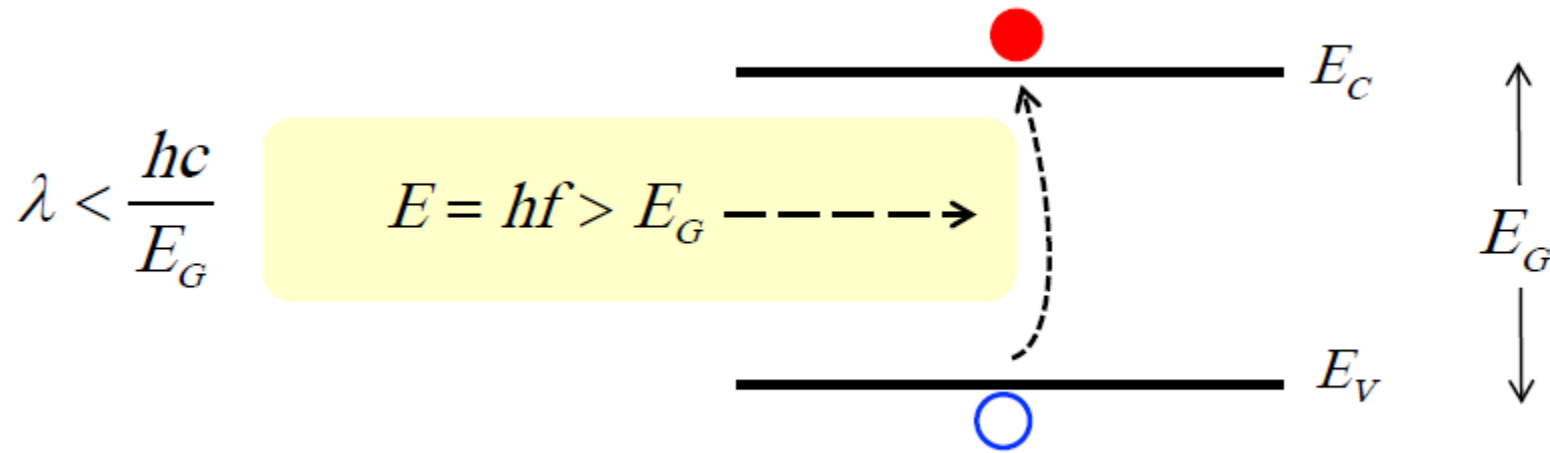
PIN



- Caractéristiques sous-éclairement
- Impacts de la qualité électronique du matériau

## Session 1 : Travaux pratiques

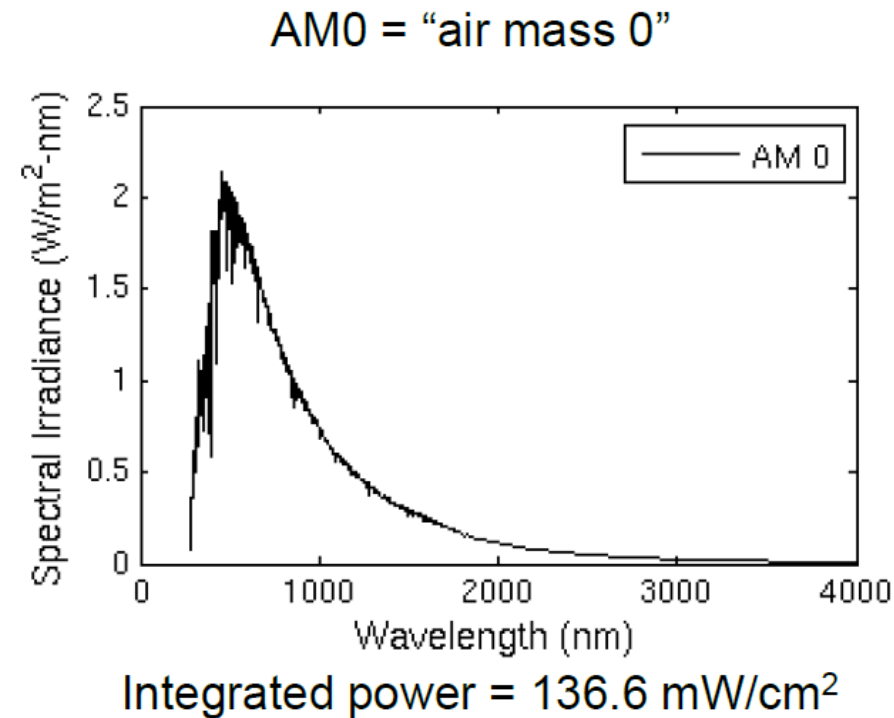
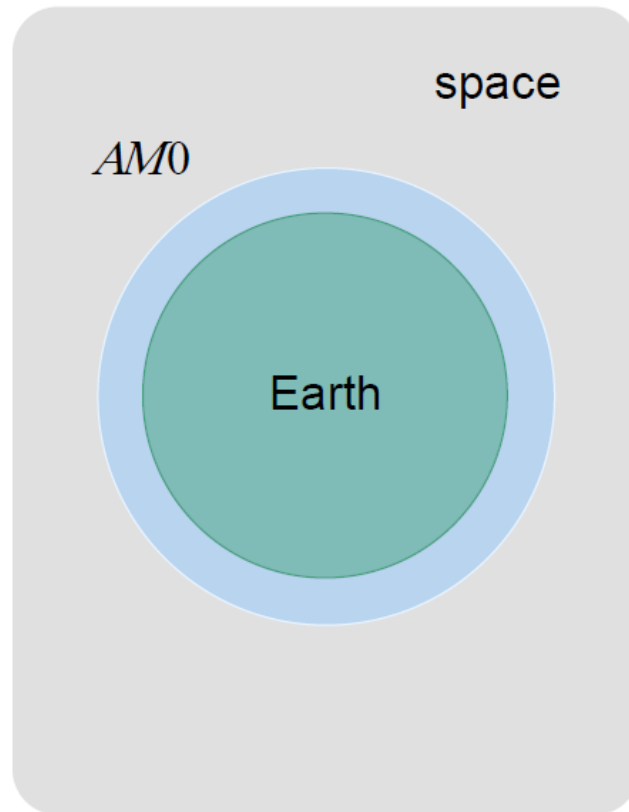
- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN
- Absorption de la lumière : Photo-courant



$$f\lambda = c \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

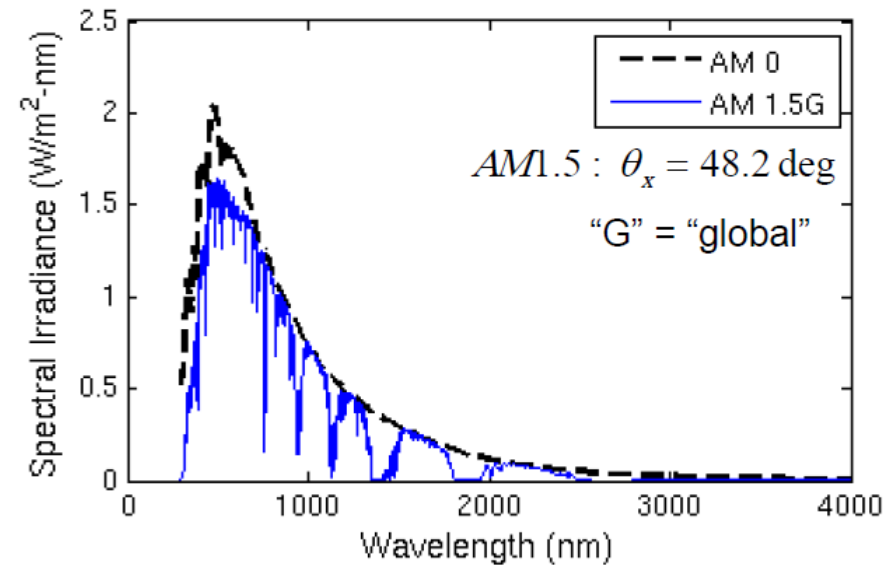
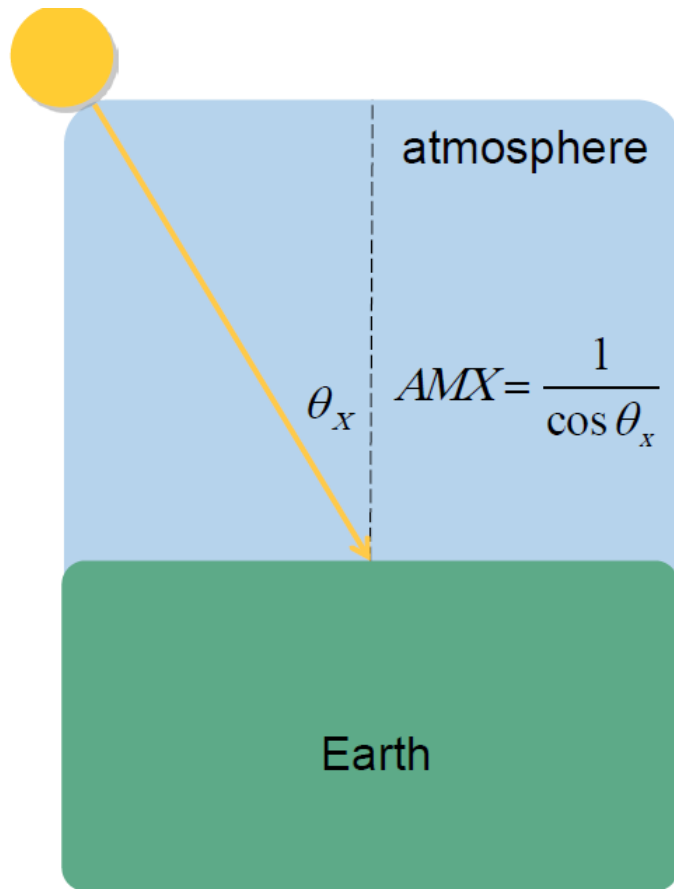
# Session 1 : Travaux pratiques

- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN
- Absorption de la lumière : Photo-courant



# Session 1 : Travaux pratiques

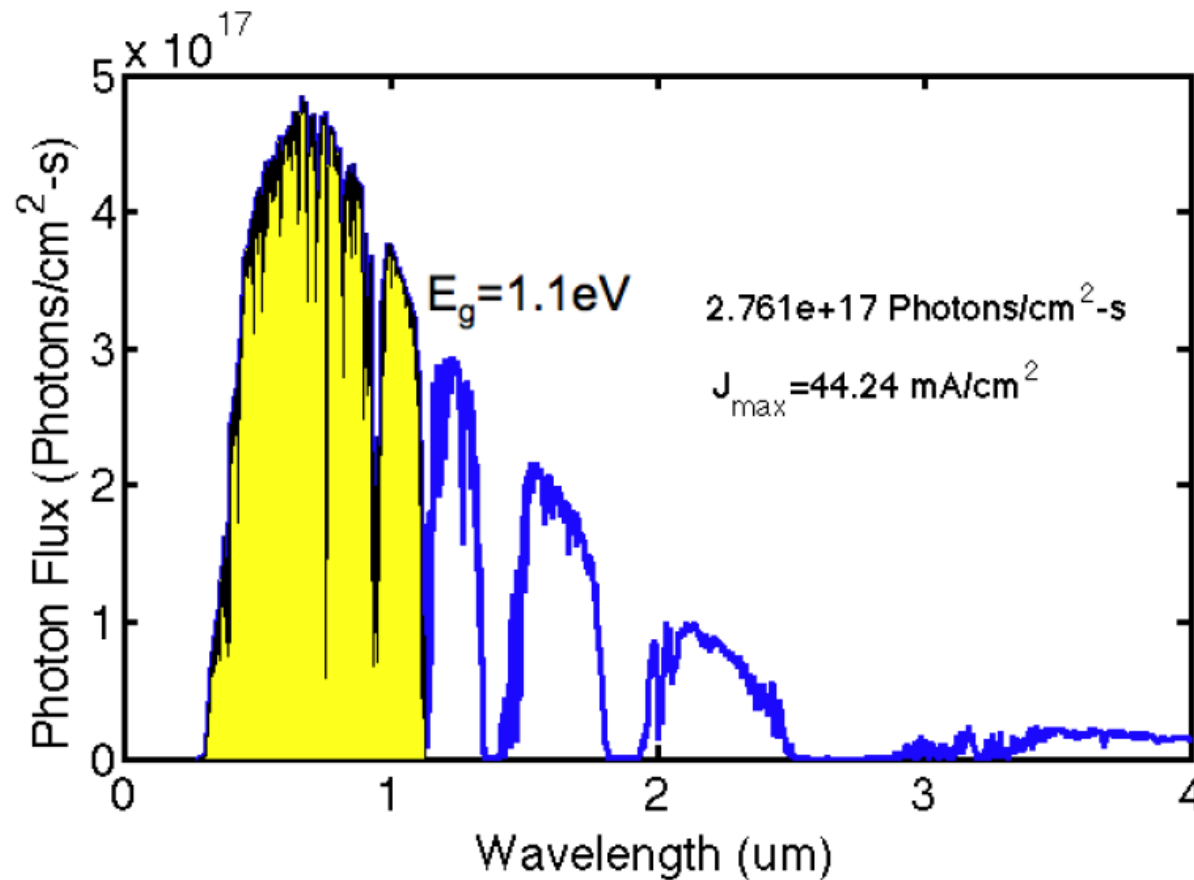
- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN
- Absorption de la lumière : Photo-courant



Integrated power = 100 mW/cm<sup>2</sup>)

# Session 1 : Travaux pratiques

- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN
- Absorption de la lumière : Photo-courant



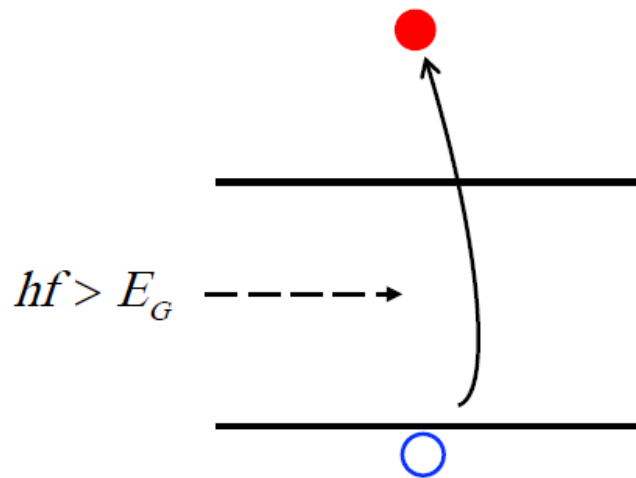
solar  
spectrum  
(AM1.5G)

Exemple : Si  $E_g = 1.1\text{ eV}$   
uniquement les photons avec  $E < E_g$   
qui seront absorbés

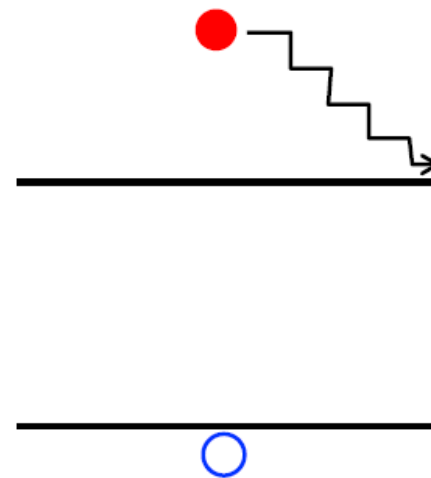
# Session 1 : Travaux pratiques

- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN
- Absorption de la lumière : Photo-courant

Energy is lost for photons with energy greater than the bandgap.



Electron is excited above the conduction band.



However, extra energy is lost due to thermalization as electron relaxes back to the band edge.

# Session 1 : Travaux pratiques

- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN
- Absorption de la lumière : combien de photons absorbés pour une épaisseur finie

Incident flux:  $\Phi_0$

Flux at position,  $x$  :  $\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha(\lambda)x}$

optical absorption coefficient:

$$\alpha(\lambda) > 0 \quad \text{for} \quad E > E_G \quad (\lambda < hc/E_G)$$

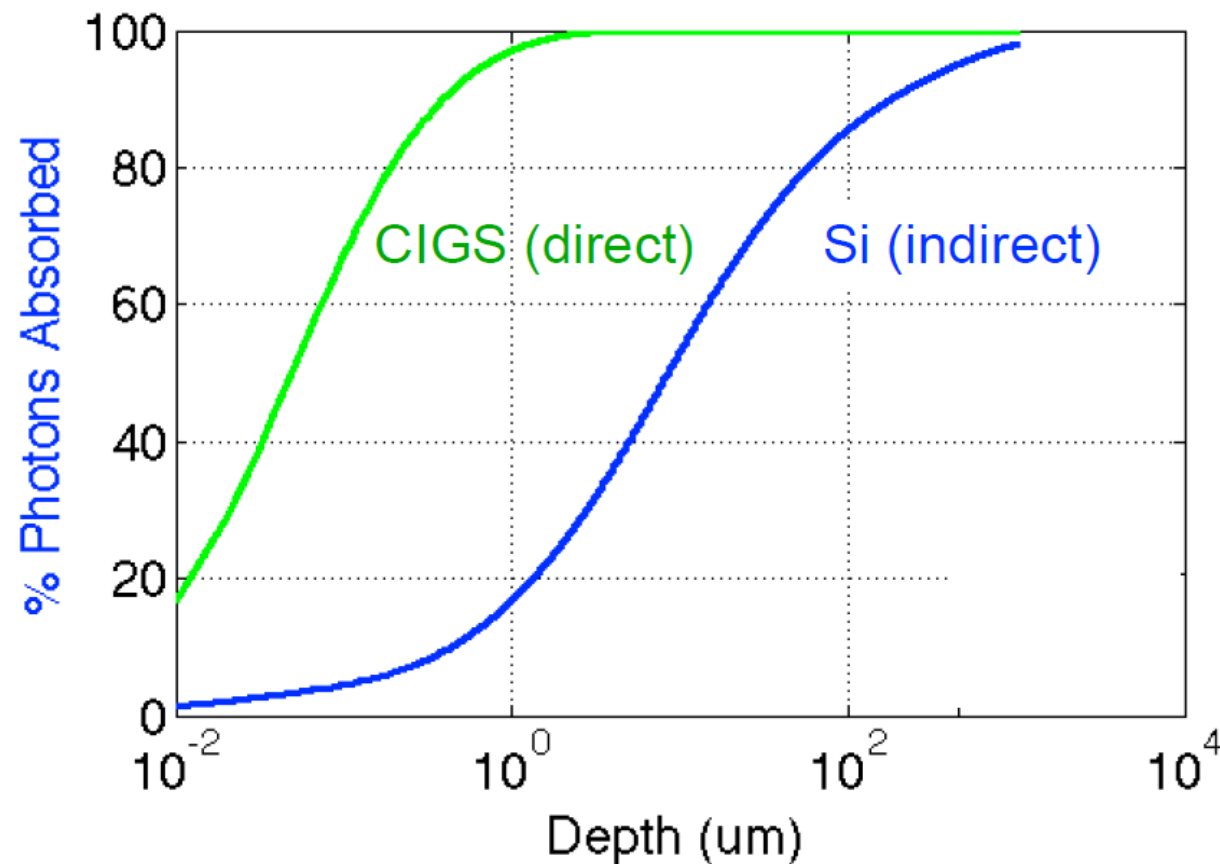
Generation rate at position,  $x$  :

$$G(x) = -\frac{d\Phi(x)}{dx} = \Phi_0 \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x}$$

$$G_{tot} = \int \left\{ \int_0^L G(x, \lambda) dx \right\} d\lambda$$

# Session 1 : Travaux pratiques

- Travaux pratiques 1: jonction PN vs jonction PIN
  - Absorption de la lumière : combien de photons absorbés pour une épaisseur finie





# ***SESSION 2 : PROJETS***

A. DARGA

## Session 2 : Projets

### Projet 1 : : cellule PV à base de CIGSe : modèle simplifié

Hétérojonction N+P ZnO/CdS/CIGSe/Mo	
ZnO-Al ( $n^+$ ): 0,5 $\mu\text{m}$	
ZnO-i (intrinseque) : 0,1 $\mu\text{m}$	
CdS ( n type) : 0,02-0,07 $\mu\text{m}$	
Cu(In <sub>1-x</sub> ,Ga <sub>x</sub> )(Se <sub>1-y</sub> S <sub>y</sub> ) <sub>2</sub> ( p type): 1-2,3 $\mu\text{m}$	
MoSe <sub>2</sub> ou MoS <sub>2</sub> :	
0,4-0,7 $\mu\text{m}$	
Mo: 0,2-0,5 $\mu\text{m}$	
Glass : 1-6 mm	

# Session 2 : Projets

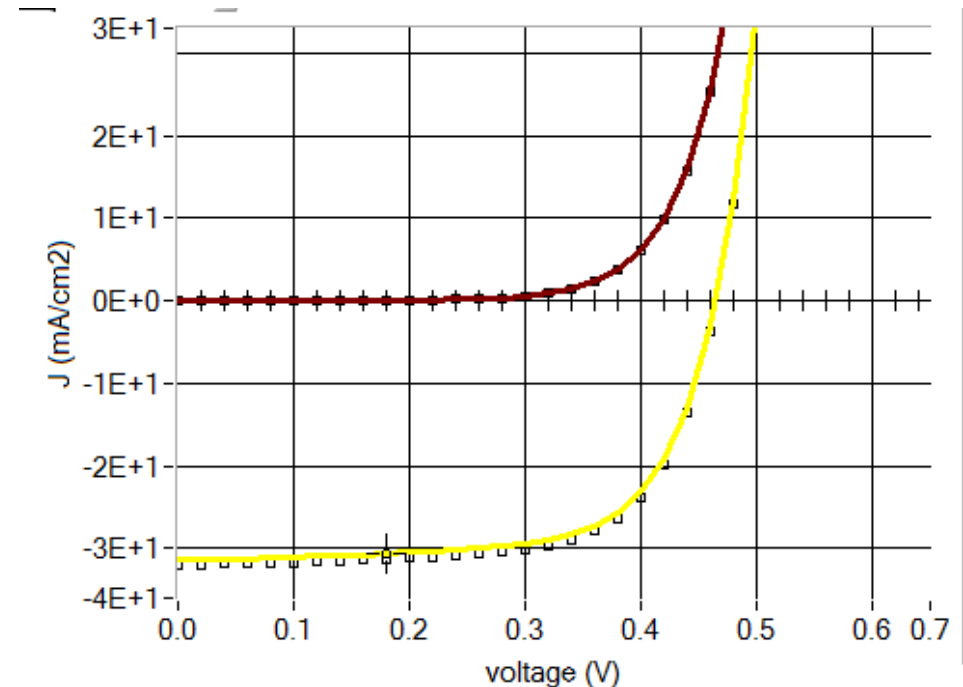
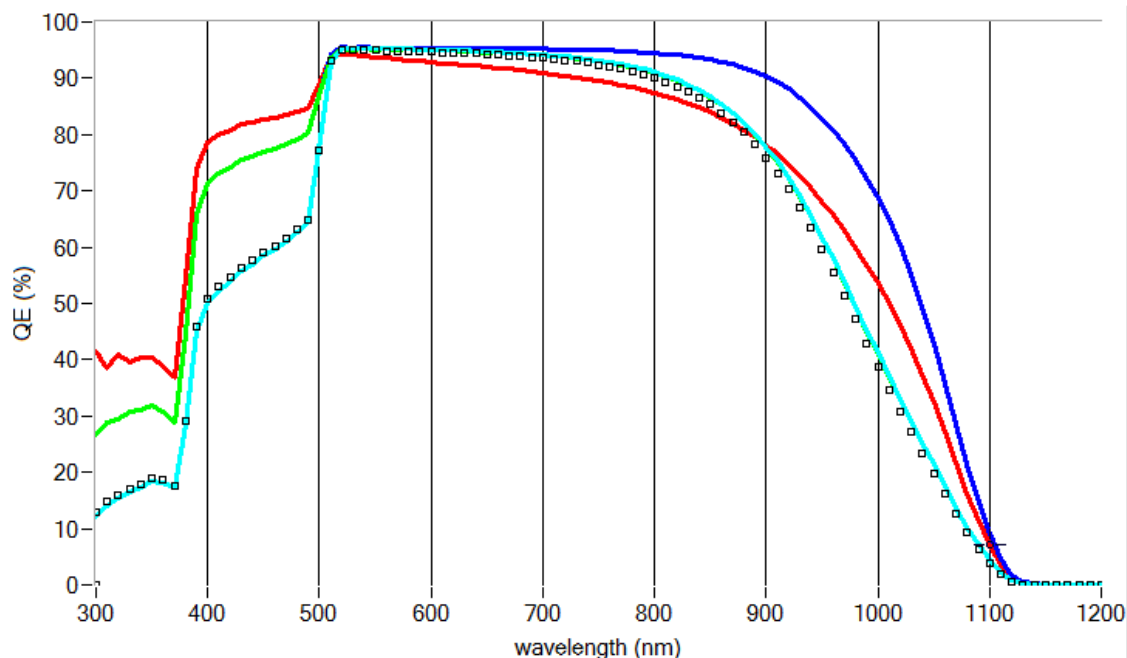
## Projet 1 : cellule PV à base de CIGSe : modèle simplifié

On cherche à reproduire par simulation, les tracés (EQE et I-V) d'une cellule PV à base CIGSe.

À partir d'un modèle de base fourni.

Les paramètres sont :

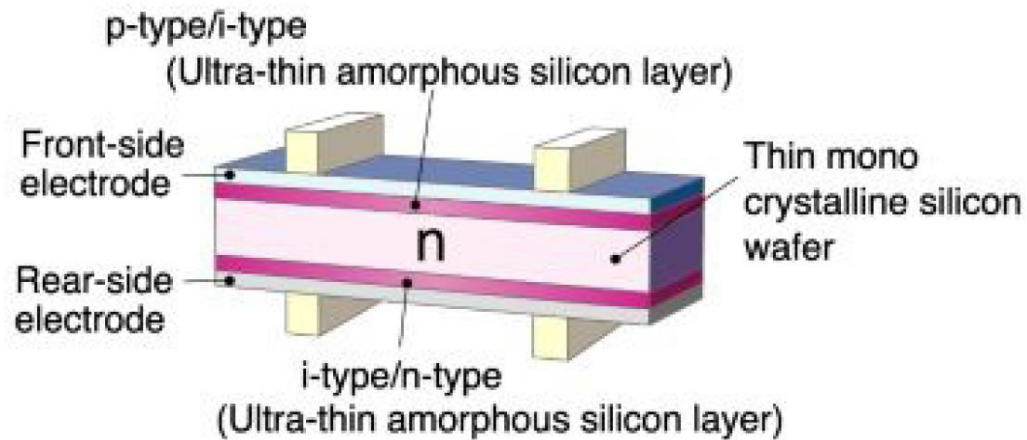
1. Épaisseur de la couche de CdS
2. Dopage de la couche de CIGSe
3. Taux de recombinaison dans la couche CIGSe



## Session 2 : Projets

### Projet 2 : Cellule PV HIT:

#### Hétérojonction P+N



# Session 2 : Projets

## Projet 2 : Cellule PV HIT : a-Si (P+)/c-Si (N)

On cherche a reproduire par simulation, les tracés (EQE et I-V ) d'une cellule PV HIT

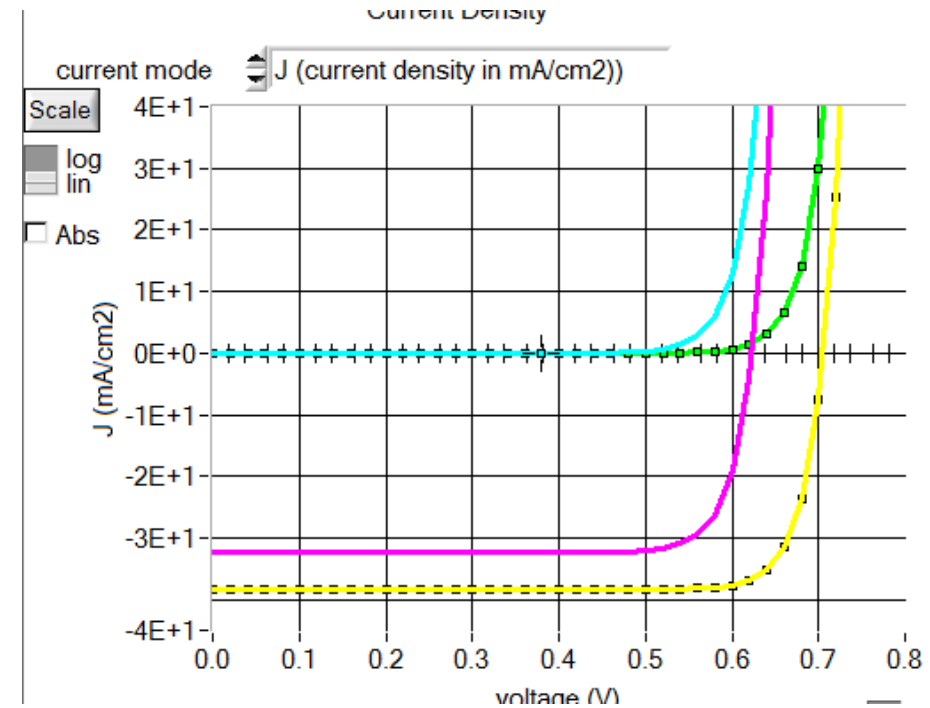
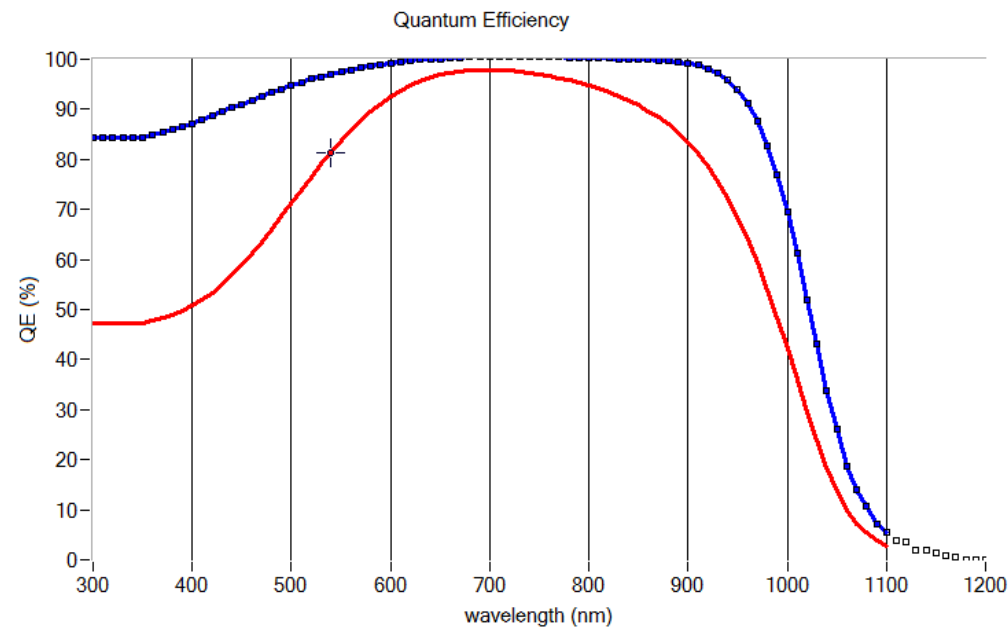
A partir d'un modèle de base fourni.

Les paramètres sont :

1. **Epaisseur de la couche a-Si (p+)**

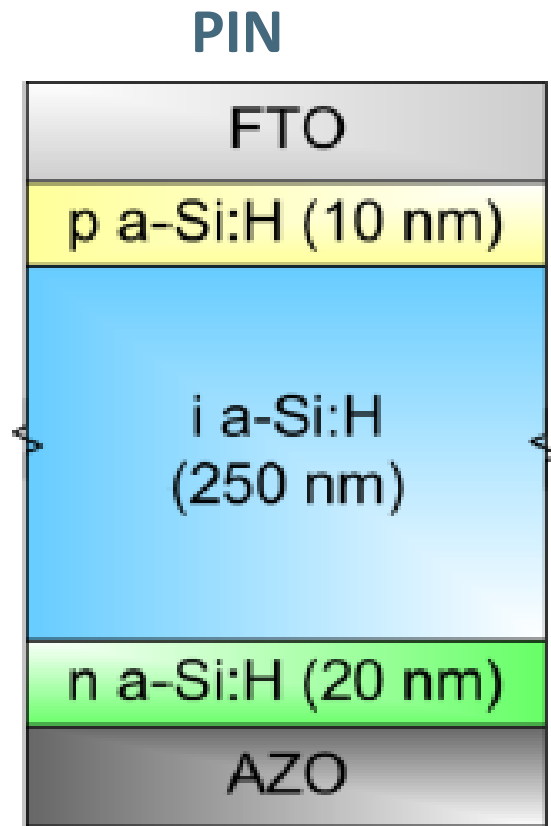
2. **Contact arrière c-Si(N)/Contact**

1. **Possibilité de rajouter une couche**



## Session 2 : Projets

### Projet 3 : Cellule PV PIN : a-Si (N+)/a-Si(i)/a-Si(P+)



## Session 2 : Projets

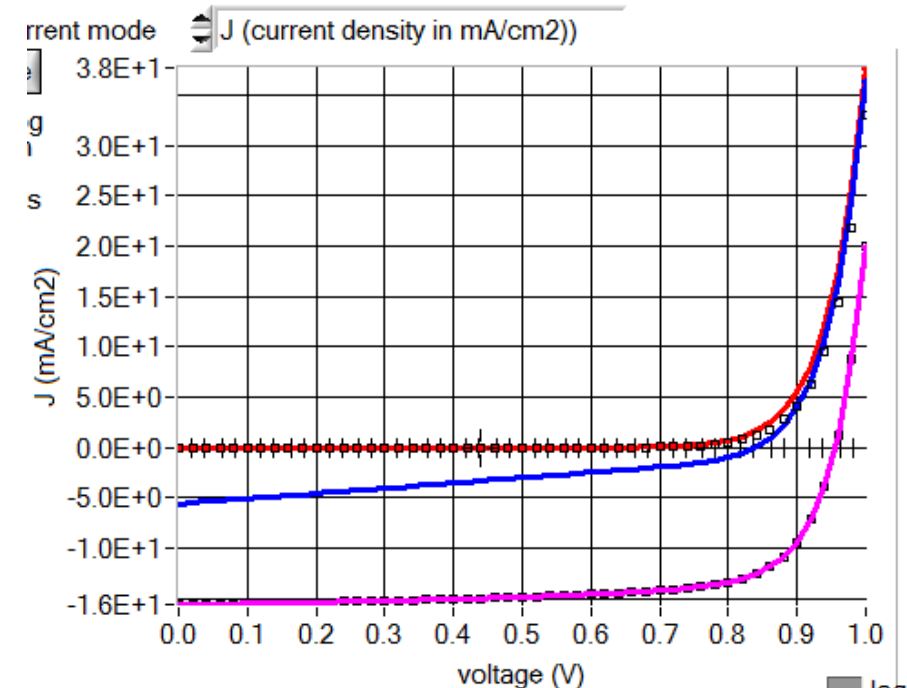
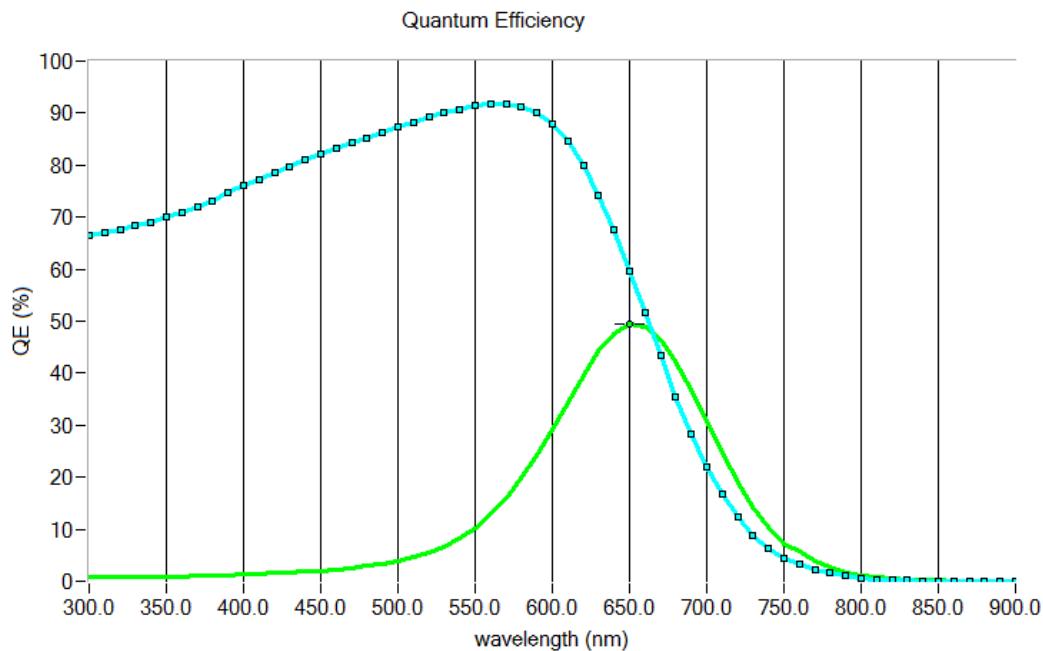
### Projet 3 : Cellule PV PIN : a-Si (N+)/a-Si(i)/a-Si(P+)

On cherche à reproduire par simulation, les tracés (EQE et I-V) d'une cellule PIN

À partir d'un modèle de base fourni.

Les paramètres sont :

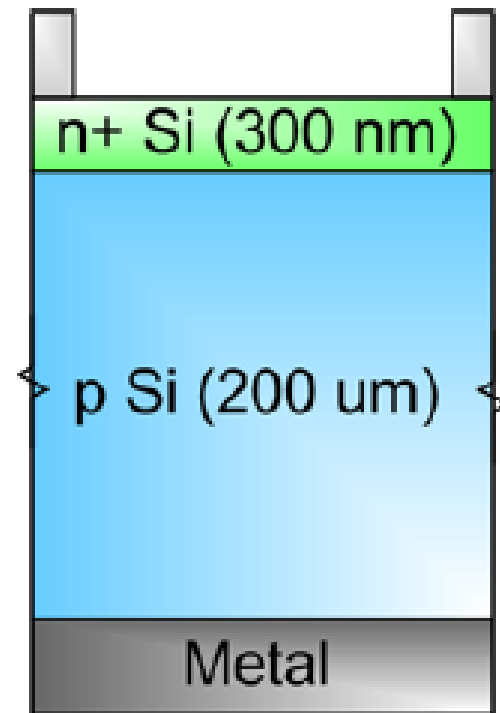
1. Épaisseur de la couche a-Si (intrinsèque)
2. Face éclairée
3. Dopage des couches P+ et N+



## Session 2 : Projets

### Projet 4 : Cellule Homojonction C-Si:

#### Homojonction PN





## *Session 2 : Projets*

### **Projet 3 : Cellule Homojonction C-Si:**

On cherche à reproduire par simulation, les tracés (EQE et I-V ) d'une cellule à base d'homojonction C-Si

A partir d'un modèle de base fourni.

Les paramètres sont :

- 1. Epaisseur de la couche émettrice**
- 2. Le dopage de la couche émettrice**
- 3. Le contact arrière C-Si (p)/Contact : possibilité de rajouter une couche**

## *Références bibliographiques*

- Cours Professeur Muhammad Ashraful Alam (Purdue University, USA)
- Cours du professeur Prof. Mark Lundstrom (Purdue University, USA)
- Livre : Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells
- Images google